

目指す検査装置

ー可搬型小型中性子装置による透視ー

山形 豊

(独) 理化学研究所 イノベーション推進センター V C A Dシステム研究プログラム 加工応用チーム

Yutaka Yamagata

Applied Fabrication Team, VCAD System Research Program, RIKEN Innovation Center

e-mail: yamagata@riken.jp

1. はじめに

中性子は、電荷を持たないため様々な物質の奥深くまで透過することが可能であり、物体の内部を透過観察する手段として有用であると考えられる。しかしながら現状の中性子源は、原子炉や大型加速器を用いたものが主流となっており、実験室レベルでの簡易な測定やフィールドでの測定に適応することは困難である。X線の場合は SPring-8 のような大型放射光施設から、中型の加速器を用いた放射光施設、そしてX線管を用いた実験室レベルの測定システムや医療現場や製造現場で利用されるX線CT装置など様々なスケールで利用可能な線源が実用に供されている。中性子線の持つ優れた性質を生かすためには、比較的小型の線源により、実験室レベルやフィールドでの実験を可能とする必要がある。こうした観点から、可搬性という点を視野に入れて小型中性子源および検出器を開発する場合にどのような構成が可能なのか、あるいはその予想される性能や適応範囲はどの程度なのかについて検討を行った。

2. 小型中性子源

小型中性子源の候補としては、中性子管、放射性同位体、小型加速器などが考えられる。中性子管はすでに一部実用に供されているが、D-T（重水素-三重水素）反応を用いたものでも発生中性子量は、 10^8 - 10^{10} (n/sec)程度、D-D反応を利用したものでは、 10^6 - 10^8 (n/sec)程度と比較的小さく、また寿命も比較的短い。放射性同位体は、自発的に放射線を発生するため簡便な線源として利用可能であるが、多くの種類は発生量が比較的小さい。 ^{252}Cf のように強力な中性子を放射するものもあるが、極めて高価でありまた半減期が比較的短いため定期的な交換が必要であるという問題点もある。こうした放射性同位体は、安全上の管理を厳しく行う必要があるため、利用の簡便性や可搬性は制約を受けると考えられる。小型加速器ベースの中性子源は、安全性や強度などの要素を考慮すると、現在最も実現性が高いと考えられる。小型加速器ベースの中性子源は、加速する粒子の種類によっていくつかに分類できる。電子線加速器は、短パルス、大電流の加速が比較的容易であるということもあり、古くから様々な形式の加速器が開発されており、中性子発生にも利用されている。近年では、SPring-8のXFELに採用されているCバンドを利用した加速器が40MeV/mを達成しており、中性子発生に必要なエネルギーを1 m程度の加速管で実現可能となりつつある。一方で、電子線を用いた中性子の発生には、40MeV程度のエネルギーが必要であり、発生する γ 線も高エネルギー

となるため、ターゲット近傍の放射線遮蔽は比較的大規模になる可能性がある。陽子／重陽子加速器は、近年医療用R I 製造等のための設備として技術が進歩し、小型で高性能な加速器が開発されるようになってきた。陽子線から中性子を発生させる場合は、BeやLiなどの軽元素に陽子を衝突させて発生させるがその際のしきい値となるエネルギーはおよそ2 MeV程度であり、低エネルギーで中性子を発生させられるため、ターゲット近傍の放射線遮蔽を小型化できる可能性がある。重陽子はさらに低いエネルギーから中性子を発生させることが可能である。

こうした状況を考慮すると、可搬性を考慮した小型中性子源としては、陽子（重陽子）加速器をベースとしたシステムが最も適していると考えられる。さらに、ターゲットとしてはすでにインディアナ大学等で実績のあるBeが当面は実用的であると考えられるⁱ。Be(p,n)反応を用いて中性子を発生させると考えた場合、その発生量は、陽子のエネルギーが4 MeVで 1.5×10^9 (n/ μ C)、7 MeVで 1.0×10^{10} (n/ μ C)の発生収率とされていることからⁱⁱ、100 μ A程度のビーム電流が取れば、 $10^{11} \sim 10^{12}$ (n/s)程度の中性子発生が見込めることになりかなり実用的なビーム強度を得られると推測される。こうした想定を元に、中性子発生源の概略を描いたものが図1である。加速器としては、線形加速器（ライナック）以外に小型サイクロトロン等で実現できる可能性もあるが、可搬型を考えた場合、偏向用の磁石の重量をいかに抑えるかが課題となるであろう。

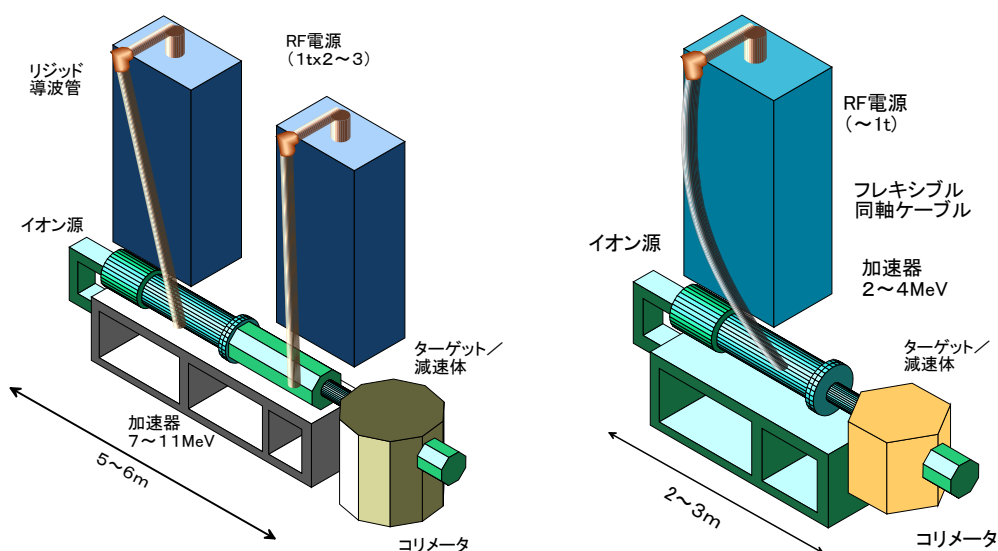


図1 想定される小型中性子源の概略図

2. 小型中性子源によるイメージング

2. 1 中性子ラジオグラフィー

熱中性子線によるラジオグラフィーは、工業部品や大型構造物の重要部材など、特に鋼製の部材に対しては非常に有用な透過観察手段になることが期待される。しかしながら、小型中性子源は、大型の原子炉等と異なり得られるビーム強度に限界がある。そのため、小型中性子源で得られると予想されるビーム強度にてどの程度のイメージングが可能なのかをある程度予測しておく必要がある。

熱中性子線の発生ということを考えた場合、Beターゲットから放射される高エネルギーの中性子を減速

し、必要なエネルギーまで下げるための減速体が必要となる。減速体の設計・最適化はビーム強度に大きな影響を及ぼす重要なパラメータである。図2は、ターゲット、減速体、放射線遮蔽を含むステーションの一例である。ターゲットから発生した中性子は、水により減速され右側の開口部から放射される。この設計は十分に最適化されたものではないが、放射線輸送シミュレーションコードPHITSⁱⁱⁱを用いたシミュレーションにより、陽子ビームのエネルギーが5.4MeV、電流が1mAの時に2mの位置で $10^6(\text{n}/\text{cm}^2/\text{sec})$ 程度、5mの位置で $10^5(\text{n}/\text{cm}^2/\text{sec})$ 程度のビーム強度が得られると予測されている^{iv}。

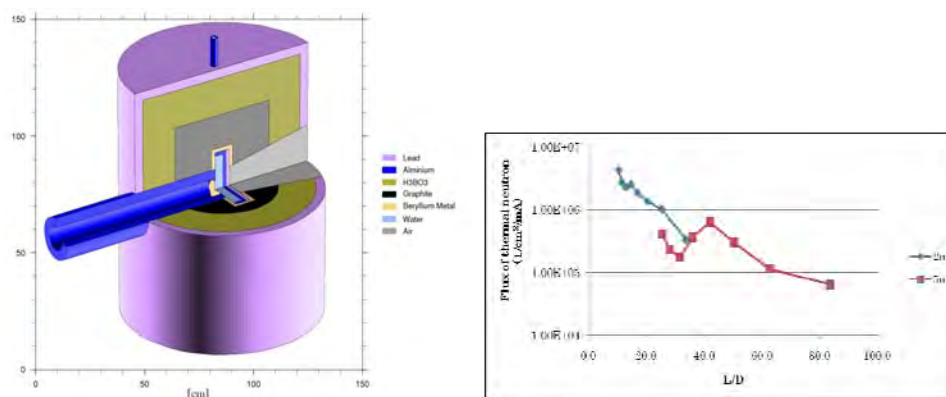
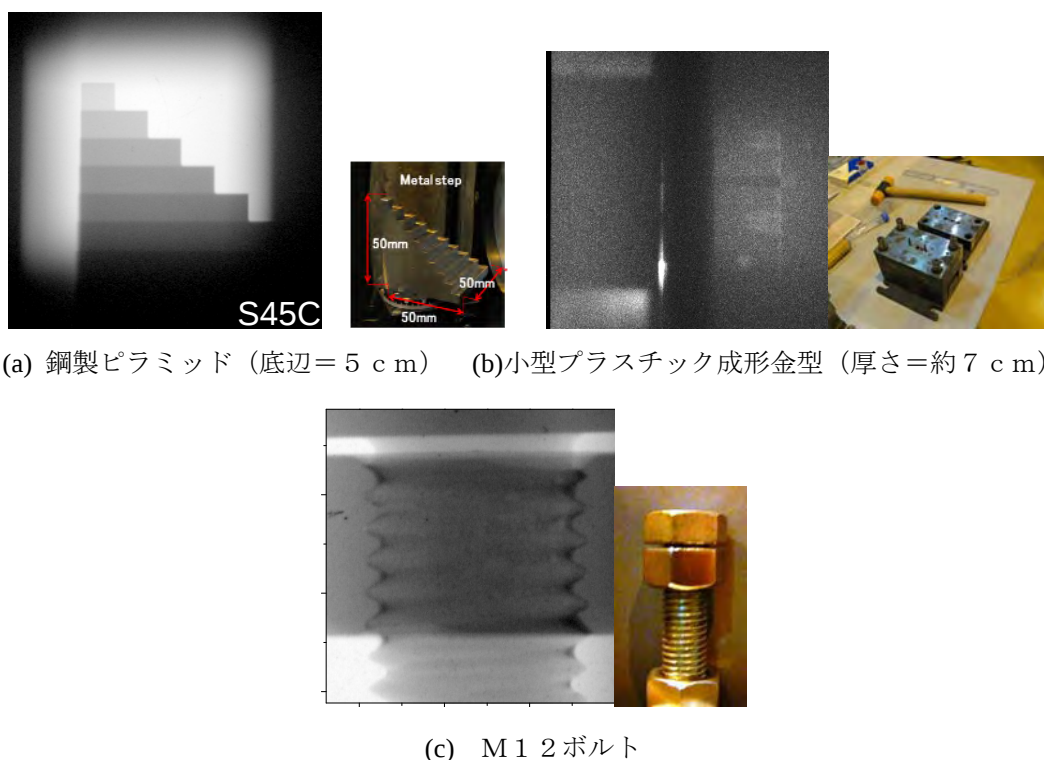


図2 ターゲット・減速体の設計例と予想されるビーム強度



(a) 鋼製ピラミッド（底辺＝5 c m） (b) 小型プラスチック成形金型（厚さ＝約7 c m）

(c) M12ボルト

図3 熱中性子線によるラジオグラフィ画像の例

こうした予測を踏まえ、著者らはこれに近いビーム強度を有すると考えられるJRR-3ガイドホールの中性子ビームポートMUSASI-L(約 $8 \times 10^5 \text{n}/\text{cm}^2/\text{sec}$)を用いた中性子ラジオグラフィの実験を行っている。

これらの結果より、数c m程度の厚さの鋼製構造物でも透過観察可能であることが確認されている^v。このこ

とは、鋼製の橋梁等のジョイント部などの内部欠陥の観察が困難な部位の透過観察等にも適応可能であることを示唆している。もちろん、鋼製の部品が多く使われている工業製品の検査技術としても非常に有効であると考えられる。

2. 2 大型構造物の透過観察

橋梁等の大型構造物の透過観察を行うには、50 cm以上の厚さのコンクリート等の透視を行うことが必要と考えられる。数十 cm以上の厚さのコンクリートを透視するにはより高いエネルギーの中性子線を利用することが必要と考えられる。そこで、仮に3 MeVの中性子線を仮定して50 cmのPC橋梁を模擬した構造体をモデル化し、PHITSにより透過シミュレーションを行った。図4にシミュレーションに使用した橋梁のモデル構造を示す。モデルは、中央部にシースを模した空洞と鋼製ワイヤーを配置し、中央部が断裂した構造としてある。この部分に対して左方から中性子ビームをあて、その透過の様子をシミュレーションした。

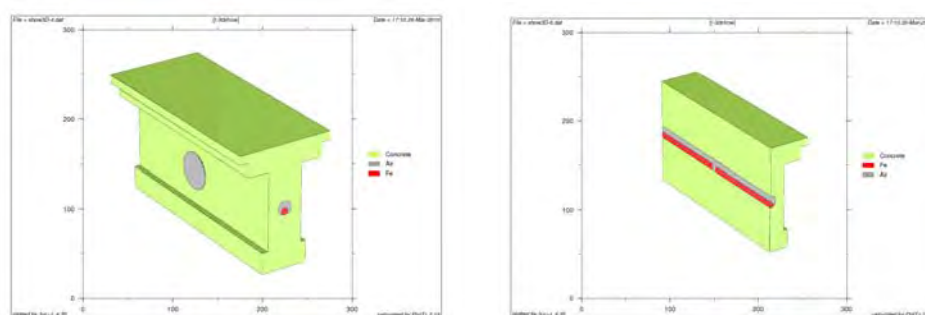
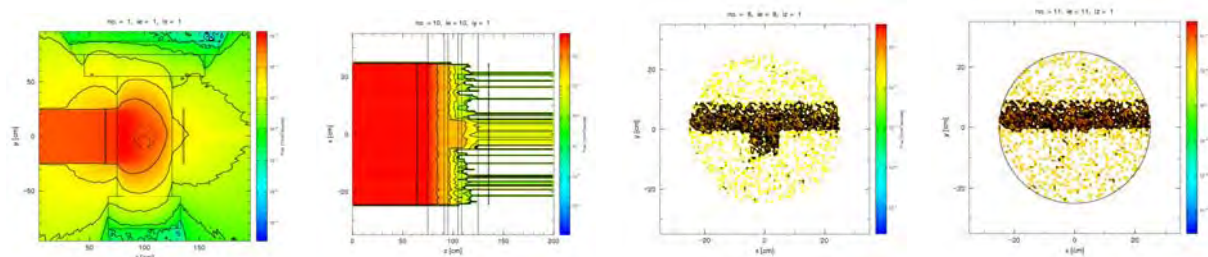


図4 PC橋梁透過観察のモデル（左：モデル全体、右：中央部断面図）



(a)全エネルギー分布 (b)3MeV のみの抽出 (c)3MeV によるイメージ (d)中央に水がある場合

図5 透過観察のシミュレーション結果

図5にシミュレーション結果を示す。全エネルギー領域で見ると、ビームは大きく散乱されているが、3 MeVのみを取り出すと、数%程度のビームが透過していることが分かる。透過したビームのうち3 MeVのみをイメージとして取り出してみると、シーす中央部の鋼製ワイヤー破断部が観察できる。更に、鋼製ワイヤーの破断部に水があるとして計算を行うと、はっきりとコントラストが出る事が確認できた。この結果は、ビーム、検出など様々な条件がシミュレーションのために理想化されており、この結果から直ちに50 cmのPC橋梁の検査が可能であると結論付けることはできないが、中性子線による大型構造物の検査の可能性を示唆する結果であると考えられる。

3. まとめ

小型中性子源とそれを用いた透過観察の可能性について検討を行った結果について述べた。小型中性子源は、小型加速器をベースとして開発を行えば、様々な透過観察に応用可能と思われるビーム強度を得ることのできるシステムの実現が可能であると予測される。第2章で説明したラジオグラフィーのみならず、パルス中性子源を用いたパルス分光イメージングによるより詳細な材料の物性情報の取得や即発ガンマ線を利用した元素分析など様々な応用が可能になると期待される。また、大型構造物の透過観察に関しては、高速中性子を用いることで透過観察可能となる可能性がシミュレーションから示された。しかしながら、現実には、可搬型として使用する場合の放射線遮蔽、安全性の確保、関連法規の適合性などの様々な課題を解決しなければならない。更に、可搬型小型中性子源の開発はもとより、検出器の開発や得られたデータの画像処理・解析手法の開発、そして大型構造物の予防保全へとつなげる道筋を検討し、真に社会の役に立つ技術として行くことが重要である。

4. 謝辞

中性子ラジオグラフィー画像の取得実験は、(独) 原子力研究開発機構 施設供用制度(2009A-A35)により実施された。小型中性子源に関する議論は、「小型中性子イメージングシステム検討委員会」の検討内容を元に著者が再編したものである。

参考文献

- i) C.M. Lavelle, D.V. Baxter, A. Bogdanov, V.P. Derenchuk, H. Kaiser, M.B. Leuschner, M. A. Lone, W. Lozowski, H. Nann, B. v.Przewoski, N. Remmes, T. Rinckel, Y. Shin, W.M. Snow, P.E. Sokol, Nuclear Instruments and Methods A 587 (2008) pp.324-341
- ii) M.R.Hawkesworth, Atomic Energy Review vol.15, No.2 p.179 (1977)
- iii) <http://phits.jaea.go.jp/>
- iv) J.Ju, K.Mishima, Y.Yamagata, H.Sunaga, K.Hirota, Y.Iwashita, H. M. Shimizu, Y. Kiyonagi, A.Makinouchi, ICANS XIX meeting (2010) IP140
- v) S. Morita, Y.Yamagata, K.Hirota, S.Mihara, D.T. Dung, H. Sunaga, T. Sera, H. Yokota, T. Shinohara, N. Metoki, A. Makinouchi, ICANS XIX meeting (2010) IP141